

BAB VII. *BIOFERTILIZER* BERBASIS *BIOCHAR* UNTUK REMEDIASI LAHAN PERTANIAN INDONESIA

Sri Wahyuni*, Sri Kadarwati, Risyia Aprilia

Program Studi Kimia FMIPA, Universitas Negeri Semarang

sriwahyunikimia@mail.unnes.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.15294/ka.v1i2.140>

ABSTRAK

Remediasi lahan pertanian di Indonesia menjadi isu yang sangat penting untuk diteliti dan dikembangkan. Penggunaan tanah dalam jangka panjang dan metode pengelolaan yang kurang tepat disinyalir menjadi penyebab utama terus turunnya kualitas tanah pada lahan pertanian dari tahun ke tahun. *Biofertilizer* berbasis bahan alam dapat dipreparasi melalui proses pirolisis biomassa yang kemudian dikenal luas sebagai *biochar*. Penggunaan *biochar* baik secara individual maupun bersamaan dengan jenis pupuk lain dilaporkan mampu memperbaiki kualitas tanah dan meningkatkan produktivitas lahan pertanian, dibandingkan dengan pengelolaan tanah tanpa penambahan *biochar*. Bab ini mengulas kondisi lahan pertanian di Indonesia dan remediasinya menggunakan *biochar* untuk perbaikan kualitas tanah dan peningkatan produktivitas lahan pertanian pada budidaya tanaman tertentu.

Kata kunci: *biochar*; *biofertilizer*; lahan pertanian.

PENDAHULUAN

Upaya untuk mempertahankan tingkat produksi tanaman pangan dapat ditempuh melalui dua pendekatan, yaitu perluasan area pertanian/perkebunan dan peningkatan produktivitas. Perluasan area pertanian/perkebunan dapat dilakukan dengan membuka lahan pertanian baru, sedangkan peningkatan produktivitas dapat dilakukan antara lain melalui perbaikan sifat-

sifat tanah (sifat fisik, kimia, dan biologi tanah). Pada umumnya lahan kering yang sudah dibudidayakan akan mengalami penurunan kualitas atau terdegradasi akibat penggunaan dalam jangka panjang atau pengelolaan yang tidak tepat. Upaya memperbaiki kualitas lahan dapat dilakukan dengan memanfaatkan pupuk kandang/kompos namun kelemahannya adalah dibutuhkan jumlah yang cukup besar dan kontinyu, sehingga pengadaan bahan tersebut kadang-kadang kurang praktis untuk lahan yang luas.

Biochar adalah bahan berbasis karbon (C) yang dikenal sebagai arang dan telah dikenal masyarakat Indonesia sejak jaman dahulu. *Biochar* atau arang memiliki potensi yang menjanjikan untuk memulihkan kualitas tanah yang terkuras unsur haranya akibat penggunaan dalam jangka panjang sebagai lahan perkebunan atau pertanian. *Biochar* dapat meningkatkan ketahanan pangan karena potensinya dalam memperbaiki kembali unsur hara yang menipis dan mengembalikan kualitas tanah sehingga lebih lama dapat digunakan sebagai lahan pertanian atau perkebunan. *Biochar* dibuat melalui perlakuan termal biomassa dalam tanur bersuhu tinggi melalui proses pembakaran tidak langsung, sebuah proses yang disebut sebagai pirolisis. Pirolisis dapat dilakukan dengan alat pembakaran atau pirolisator dengan suhu 250-350 °C selama 1-3,5 jam, bergantung pada jenis biomassa dan alat pembakaran yang digunakan. Kedua jenis pembakaran tersebut dapat menghasilkan *biochar* yang bisa diaplikasikan sebagai pembenah tanah (*fertilizer*). *Biochar* bukan pupuk tetapi berfungsi sebagai *fertilizer*.

Biochar dapat dibuat dari segala bentuk biomassa, misalnya kotoran hewan, limbah pertanian, sisa produk hutan, dan banyak lagi. Bahan baku dan variabel pada proses pirolisis akan mempengaruhi karakteristik *biochar* yang dihasilkan. Menurut peradaban kuno ribuan tahun yang lalu, arang yang ditempatkan di dalam tanah dan dikombinasikan dengan limbah rumah tangga khususnya makanan akan menciptakan tanah yang subur dan kaya nutrisi yang masih digunakan sampai sekarang (Mustafa, *et al.*, 2022).

KONDISI LAHAN PERTANIAN DI INDONESIA

Lahan pertanian adalah tanah yang digunakan sebagai media budidaya tanaman atau peternakan. Lahan merupakan salah satu sumber daya utama pada usaha tani karena dalam proses budidaya tanaman pasti membutuhkan tempat untuk tumbuh. Oleh karena itu, kondisi lahan pertanian Indonesia perlu diketahui dengan baik untuk mengoptimalkan produktivitas lahan pertanian. Secara umum, lahan pertanian di Indonesia dapat dibedakan menjadi lahan basah yang biasa berupa lahan sawah dan lahan kering yang biasa berupa ladang dan tegalan. Keberadaan lahan pertanian akan menghasilkan bahan pangan untuk memenuhi kebutuhan manusia. Indonesia yang memiliki tren pertumbuhan penduduk yang tinggi mengakibatkan adanya pergeseran fungsi lahan pertanian menjadi pemukiman maupun industri.

Kementerian Agraria dan Tata Ruang/Badan Pertanahan Nasional (ATR/BPN) Tahun 2020 telah menyampaikan hasil verifikasi luas lahan baku sawah. Berdasarkan hasil perhitungan ulang tahun 2019, pemerintah mencatat bahwa luas lahan baku sawah hanya tinggal 7,46 juta hektar saja. Sementara itu, berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), luas panen padi Tahun 2020 hanya mencapai 10,66 juta hektar atau mengalami penurunan sebesar 0,19 persen dibandingkan dengan Tahun 2019 yang berjumlah 10,68 juta hektar atau 20,61 ribu hektar. Penyusutan luas lahan pertanian secara terus menerus ini jelas tidak menguntungkan posisi pembangunan industri pertanian Indonesia. Produktifitas lahan pertanian pada Tahun 2020 memang menghasilkan sejumlah 54,65 juta ton Gabah Kering Giling (GKG) atau mengalami kenaikan 0,08 persen dibandingkan Tahun 2019. Jika dikonversikan menjadi komoditas beras untuk bahan konsumsi pangan, maka pada Tahun 2020 jumlahnya mencapai 31,33 juta ton atau mengalami peningkatan sebesar 0,07 persen dibandingkan Tahun 2019. Tapi, faktanya peningkatan ini tidak mampu mengatasi ketergantungan atas impor bahan pangan yang disebabkan oleh penyusutan luas lahan.

Penyusutan lahan pertanian sejatinya telah terjadi sejak 10 tahun lebih, mengacu pada data BPS tahun 2010, menunjukkan fakta saat itu lahan pertanian Indonesia diperkirakan hanya seluas 9,29 juta hektar, dengan jumlah penduduk 237,6 juta jiwa. Pada tahun 2020, jumlah penduduk Indonesia berdasar data BPS yang diolah oleh media riset DATACORE mencapai 276.647.735 jiwa. Artinya, produksi beras yang lebih banyak sangat diperlukan apabila hendak mengurangi ketergantungan terhadap impor. Penyusutan luas lahan pertanian yang berdampak pada turunnya produktifitas hasil pertanian dan jumlah konsumsi pangan yang meningkat perlu mendapatkan perhatian yang serius dan diupayakan solusinya.

Secara definisi, lahan sawah merupakan lahan pertanian yang berpetak-petak yang dibatasi oleh pematang/ galengan atau saluran untuk menahan/ menyalurkan air. Lahan ini biasa ditanami tanaman padi. Penurunan luas lahan sawah dapat terjadi karena adanya pembangunan infrastruktur, baik itu berupa pembuatan/ pelebaran jalan maupun pembangunan perumahan. Penurunan luas sawah merupakan masalah serius, karena di sawah-lah tumbuh tanaman yang menghasilkan makanan pokok penduduk Indonesia. Perlu diingat, bahwa peningkatan jumlah produksi pangan suatu wilayah sejalan dengan adanya peningkatan luas lahan dan produktivitasnya, begitu pula sebaliknya. Karena terbatasnya jumlah lahan yang bisa menghasilkan produksi pangan maka perlu diupayakan peningkatan produktivitas hasil pertanian melalui perbaikan kondisi lahan dengan cara pemupukan dan fertilisasi (peningkatan kualitas) agar bisa meningkatkan produktivitas.

UPAYA REMEDIASI LAHAN PERTANIAN DI INDONESIA

Pergeseran fungsi lahan akibat industrialisasi, dengan merubah fungsi lahan pertanian telah menyebabkan berkurangnya lahan pertanian di Indonesia. Kegiatan industri ini juga telah berdampak pada terjadinya pencemaran tanah dan air. Akibat pencemaran ini antara lain juga dapat menurunkan kualitas dan kuantitas hasil/produk pertanian, terganggunya kenyamanan dan

kesehatan manusia atau makhluk hidup lain. Dampak negatif yang menimpa lahan pertanian dan lingkungannya perlu mendapatkan perhatian yang serius, karena limbah industri yang mencemari lahan pertanian akan mengganggu produktivitas tanah serta berakibat lebih jauh terhadap kesehatan makhluk hidup.

Tanah dikategorikan subur apabila tanah mengandung cukup nutrisi bagi tanaman maupun mikro organisme, dan dari segi fisika, kimia, dan biologi memenuhi untuk pertumbuhan. Tanah dapat rusak karena terjadinya pencemaran tanah. Pencemaran tanah merupakan keadaan di mana materi fisika, kimia, maupun biologis masuk dan mengakibatkan perubahan alami lingkungan tanah. Pencemaran dapat terjadi karena kegiatan rutin manusia maupun akibat kecerobohan, seperti kebocoran limbah cair atau bahan kimia industri atau penggunaan pestisida yang berlebihan.

Pencemaran tanah juga dapat memberikan dampak terhadap ekosistem. Perubahan kimiawi tanah yang radikal dapat timbul dari adanya bahan kimia beracun/berbahaya bahkan pada dosis yang rendah sekalipun. Perubahan ini dapat menyebabkan perubahan metabolisme dari mikroorganisme endemik dan antropoda yang hidup di lingkungan tanah tersebut. Dampak pada pertanian terutama perubahan metabolisme tanaman yang pada akhirnya dapat menyebabkan penurunan hasil pertanian. Hal ini dapat menyebabkan dampak lanjutan pada konservasi tanaman dalam hal ini tanaman tidak mampu menahan lapisan tanah dari erosi. Beberapa bahan pencemar ini memiliki waktu paruh yang panjang dan pada kasus lain bahan-bahan kimia derivatif akan terbentuk dari bahan pencemar tanah utama.

Terdapat beberapa cara untuk mengurangi dampak dari pencemaran tanah, antara lain dengan remediasi dan bioremediasi. Remediasi yaitu dengan cara membersihkan permukaan tanah yang tercemar. Sedangkan Bioremediasi dengan cara proses pembersihan pencemaran tanah dengan menggunakan mikroorganisme seperti jamur dan bakteri. Ada dua jenis remediasi tanah, yaitu *in-situ* (atau *on-site*) dan *ex-situ* (atau *off-site*). Pembersihan *on-site* adalah pembersihan di lokasi.

Pembersihan ini lebih murah dan lebih mudah, terdiri dari pembersihan, venting (injeksi), dan bioremediasi. Pembersihan off-site meliputi penggalian tanah yang tercemar dan kemudian dibawa ke daerah yang aman dan setelah itu tanah tersebut dibersihkan dari zat pencemar.

Penurunan kualitas tanah atau lahan juga dapat disebabkan oleh budidaya lahan dalam waktu lama. Pada umumnya lahan kering yang sudah dibudidayakan akan mengalami penurunan kualitas lahan atau telah terdegradasi akibat pengelolaan yang tidak tepat. Penggunaan pupuk kandang atau kompos memang dapat memperbaiki kondisi tanah namun memerlukan jumlah yang banyak dan harus dilakukan terus-menerus. Di Indonesia, terdapat limbah pertanian yang dapat dimanfaatkan untuk memperbaiki kualitas tanah. Limbah pertanian terdiri atas dua jenis yaitu bahan yang mudah terdekomposisi seperti jerami, batang jagung, limbah sayuran dan bahan yang sulit terdekomposisi seperti sekam padi, kayu-kayuan, tempurung kelapa, tempurung kelapa sawit, dan tongkol jagung. Limbah pertanian tersebut belum dimanfaatkan dengan baik untuk memperbaiki kualitas tanah. Limbah pertanian yang sulit terdekomposisi dapat dikonversi terlebih dahulu menjadi *biochar* (arang) melalui proses pirolisis.

POTENSI *BIOCHAR* DALAM REMEDIASI LAHAN PERTANIAN

Konsep *biochar* berasal dari peradaban Amazon kuno ribuan tahun yang lalu. Pada waktu itu, arang ditempatkan di tanah, dikombinasikan dengan sisa-sisa masakan (makanan), menghasilkan tanah terra petra, yaitu tanah yang gelap, kaya nutrisi dan sangat subur yang masih digunakan sampai sekarang. *Biochar* memiliki struktur permukaan berpori dan sifat kimia yang memungkinkannya menangkap dan menahan partikel kecil. Kemampuan ini cocok untuk menarik dan menahan nutrisi, kelembaban, dan bahan kimia pertanian, serta menyediakan tempat bagi mikroorganisme dan jamur untuk tinggal. Selain itu, *biochar* tidak rentan terhadap degradasi dan kerusakan, bertahan lebih lama di tanah daripada jenis bahan organik lainnya (tanah

terra preta telah bertahan selama ribuan tahun), sehingga efeknya tahan lama.

Hasil penelitian mengungkapkan bahwa *biochar* sangat bermanfaat bagi pertanian terutama untuk perbaikan kualitas lahan yaitu sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Perlakuan dengan *biochar* dapat meningkatkan kesuburan pada tanah atau lahan dan memulihkan kualitas tanah yang telah terdegradasi. Dalam bidang pertanian, *biochar* dapat meningkatkan ketersediaan unsur-unsur hara dan mempertahankannya dalam waktu lama. *Biochar* juga menahan cadangan air pada tanah dan meningkatkan pH serta kapasitas tukar kation pada tanah kering yang bersifat asam. Struktur *biochar* merupakan habitat yang baik bagi perkembangan mikroorganisme simbiotik seperti mikoriza karena kemampuannya dalam menahan air dan udara serta menciptakan lingkungan yang bersifat netral khususnya pada tanah-tanah masam. Pada akhirnya, keberadaan *biochar* mampu meningkatkan produksi tanaman pangan, mengurangi laju emisi CO₂, dan mengakumulasi karbon dalam jumlah besar dan bertahan lama di dalam tanah (>400 tahun) karena sulit terdekomposisi (Nurida *et al.*, 2013).

Sering disarankan bahwa aplikasi *biochar* untuk tanah dapat meningkatkan produktivitas pertanian (Lehmann *et al.*, 2003c; Blackwell *et al.*, 2009). Berdasarkan banyak kajian dari banyak penelitian (>90%), menyatakan bahwa peningkatan hasil panen tanaman yang diinduksi *biochar* tampak jelas, sementara Lehmann *et al.* (2005) melaporkan bahwa, tergantung pada jumlah *biochar* yang ditambahkan, perbaikan signifikan pada produktivitas tanaman dicapai mulai dari 20% hingga 220%. Blackwell *et al.* (2009) menunjukkan bahwa daftar tanaman yang diselidiki dibatasi dan tidak termasuk penyelidikan di padang rumput, semak dan pohon, atau bahkan tanaman tropis abadi. Dalam kasus terakhir, tanah tropis biasanya sangat lapuk, bersifat asam (unsur toksisitas), menunjukkan tingkat pencucian (*leaching*) yang tinggi dan memiliki kandungan tanah liat yang tinggi, jadi pendekatan manajemen peningkatan produktivitas tanah yang cenderung menghasilkan manfaat positif di sini, sebagai

lawan dari banyak tanah pertanian beriklim sedang. Pentingnya keterkaitan terhadap pengembangan yang dengannya aplikasi *biochar* dapat meningkatkan produksi pertanian adalah pendorong penting dalam setiap upaya untuk mengembangkan sistem yang secara ekonomis menggabungkan produk pirolisis di dalam tanah. Ini bukan satu-satunya pertimbangan (penyerapan karbon juga sangat penting), tetapi membutuhkan investasi jangka panjang dalam eksperimen pertanian.

Ketersediaan air tanah adalah faktor kunci dalam menentukan produktivitas pertanian di seluruh dunia. Peningkatan zat organik tanah kemungkinan akan meningkatkan ketersediaan air. Tanah *terra preta* telah terbukti memiliki kelembaban yang lebih tinggi (Lehmann *et al.*, 2003c) daripada tanah di sekitarnya. Peningkatan kapasitas tanah diketahui sebagai akibat penambahan *biochar*. Peningkatan kadar air tanah atau kapasitas menahan air tanah akibat *biochar* mungkin memiliki manfaat yang lebih besar di tanah berpasir dibandingkan tanah lempung. Hal ini menunjukkan bahwa tanah dengan fraksi lempung tinggi cenderung tidak terpengaruh oleh penambahan *biochar* (Woolf, 2008). Hal ini seolah-olah tidak konsisten dengan manfaat pertanian yang tampak pada tanah *Terra preta* yang mengalami perbaikan keseimbangan kadar air tanah/tanaman, meningkatnya retensi air, terutama di zona perakaran, juga adanya pengaruh, peningkatan atau penurunan nutrisi tanah (Major *et al.*, 2009).

Secara alami, arang dan *biochar* sangat berpori dan jika sifat hidrofobisitasnya diatasi maka akan memiliki potensi untuk mengoksidasi dan menyerap serta menahan air (Cheng *et al.*, 2006). Dalam beberapa kasus penggunaan *biochar* dapat meningkatkan permeabilitas air tanah, tetapi ini akan menjadi lebih sulit pada tanah dengan kandungan lempung yang tinggi (Asai *et al.*, 2009). Tanah *anthrosol* amazon menunjukkan nilai retensi air 18% lebih tinggi relatif terhadap tanah terdekat tanpa *biochar* (Glaser *et al.*, 2002). Jadi penggunaan *biochar* pada tanah dapat menurunkan kebutuhan irigasi. Hal ini didukung beberapa eksperimen yang menyatakan bahwa penggunaan *biochar* pada tanah memberi pengaruh dalam relasinya dengan kadar air.

Karakteristik fisik biochar maka akan ada perubahan distribusi ukuran pori tanah dan ini bisa mengubah pola perkolasi, waktu tinggal dan jalur aliran larutan tanah Major *et al.* (2009). Jika *biochar* mengandung zat humat dalam jumlah yang cukup maka ini dapat meningkatkan tanah kapasitas menahan air. Jika kapasitas menahan air meningkat maka harapan adanya manfaat nutrisi pada tanah juga dapat dicapai karena mobilitas unsur-unsur hara dalam menjadi lebih baik.

Pengaruh biochar pada sifat-sifat tanah

Hasil penelitian melaporkan bahwa tanaman jagung pada kondisi cuaca alami yang pupuknya dicampur dengan *biochar* dengan kisaran dosis tertentu dapat meningkatkan kapasitas penahanan air pada tanah berpasir sebesar 6-25% (Karhu *et al.*, 2011). Sementara pada tanah lempung berlumpur, pemupukan yang disertai *biochar* dapat meningkatkan kapasitas penahanan air hingga 11%. Kapasitas penahanan air dapat meningkat hingga 100% untuk tanah berpasir pada penambahan *biochar* sekitar 20 Mg ha⁻¹ dan juga membantu menyeimbangkan fluktuasi ketersediaan air dalam tanaman selama siklus pertumbuhan (Liu, *et al.*, 2012).

Penambahan *biochar* antara 1-10 Mg ha⁻¹ sedikit meningkatkan pH tanah, sedangkan penambahan *biochar* sebesar 40 Mg ha⁻¹ meningkatkan nilai pH tanah segera setelah pemupukan dilakukan; pH tanah ini dihitung nilai reratanya setelah tanaman dipanen. Penambahan *biochar* minimal 10 Mg ha⁻¹ meningkatkan ketersediaan unsur K dan Mg dalam tanah, tetapi tidak untuk unsur Ca ketika penggunaan *biochar* dikombinasikan dengan pupuk biogas. Setelah panen, konsentrasi Ca dan K dalam tanah menjadi lebih tinggi jika sebelumnya pemupukan dilakukan dengan menambahkan sekurang-kurangnya 10 Mg ha⁻¹ *biochar* (Glaser *et al.*, 2002). Sementara itu, di tanah berpasir, pemupukan dengan kompos yang ditambah *biochar* dengan rasio 30/20 (Mg ha⁻¹) dapat meningkatkan konsentrasi unsur K secara signifikan dibandingkan jika hanya menggunakan kompos saja (Liu *et al.*, 2012). Namun untuk konsentrasi unsur-unsur Ca, Mg, Al, Na dan P tidak

mengalami perubahan yang signifikan oleh penambahan biochar ini (Liu *et al.*, 2012).

Penambahan *biochar* ($\pm 10 \text{ Mg ha}^{-1}$) ketika proses pemupukan juga meningkatkan kapasitas pertukaran kation. Kapasitas pertukaran kation *biochar* dipengaruhi oleh gugus fungsi permukaan seperti $-\text{OH}$ fenolik dan gugus karboksilat (Liu *et al.*, 2013) tetapi nilainya bervariasi bergantung pada kondisi bahan baku dan proses pembakaran pada saat pembuatannya (Wiedner *et al.*, 2013). Peningkatan gugus fungsi permukaan adalah proses alami penuaan *biochar* dalam tanah (Glaser *et al.*, 2000). Kadar abu dan nilai pH juga mempengaruhi kapasitas pertukaran kation. Peningkatan kapasitas pertukaran kation setelah penambahan *biochar* dapat juga disebabkan oleh input abu yang menempel pada permukaan *biochar*. Kapasitas pertukaran kation yang masih lebih tinggi setelah panen mungkin juga disebabkan oleh oksidasi permukaan *biochar* yang menghasilkan gugus fungsi karboksil, hidroksil, dan permukaan fenolik yang mengandung oksigen bermuatan negatif (Atkinson *et al.*, 2010; Uchimiya *et al.*, 2011). Jadi kapasitas tukar kation lebih tinggi pada tanah yang menggunakan pemupukan disertai *biochar* dari pada tanah yang pemupukannya tanpa *biochar*.

Penambahan *biochar* bersamaan dengan pemupukan ($\pm 10 \text{ Mg ha}^{-1}$) juga meningkatkan konsentrasi N total dalam tanah (Glaser *et al.*, 2002). Tanah yang diolah dengan *biochar* menunjukkan konsentrasi N total yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan yang sesuai tanpa *biochar*. Dalam semua pengolahan tanah yang lain, konsentrasi N yang tersedia di tanaman tidak secara signifikan dipengaruhi oleh aplikasi *biochar*, (DeLuca *et al.*, 2006; Jones *et al.*, 2012). Namun, N yang tersedia untuk tanaman dari *biochar* dan kompos lebih rendah dari N dari kompos tanpa *biochar* setelah panen. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas mikroba melumpuhkan mineral N. Penurunan aktivitas mikroba setelah penambahan *biochar* juga dapat terjadi walaupun kecil kemungkinannya karena rasio C/N pada kompos sebesar 10 adalah sangat rendah dan bahkan setelah penambahan *biochar* hanya berubah menjadi 17.

Aplikasi *biochar* umumnya meningkatkan konsentrasi P yang tersedia untuk tanaman di tanah secara signifikan bila dikombinasikan dengan pupuk mineral. *Biochar* mempengaruhi penyerapan P, K, Mg dan Zn ke dalam tanaman (jagung). Jumlah penambahan *biochar* yang tinggi meningkatkan konsentrasi P secara signifikan pada jagung bila dikombinasikan dengan pupuk mineral atau biogas. Serapan P jauh lebih tinggi ke dalam *Vigna unguiculata*, sejenis kacang panjang, ketika *biochar* dikombinasikan dengan pupuk mineral atau pupuk kandang atau kombinasi keduanya dalam sol Ferral (Lehmann *et al.*, 2003b). Serapan P yang lebih tinggi juga dilaporkan pada tanaman jagung ketika *biochar* 10–20 Mg ha⁻¹ diterapkan (Uzoma *et al.*, 2011). Penambahan *biochar* untuk mineral dan pupuk organik meningkatkan konsentrasi K dan serapannya pada jagung. Pengaruh yang sama juga terjadi pada tanaman kacang panjang yang ditanam di sol Ferral dan biji jagung (Uzoma *et al.*, 2011). Penambahan *biochar* meningkatkan konsentrasi Zn pada jagung secara signifikan demikian juga pada tanaman kacang panjang (Lehmann *et al.*, 2003b). Namun demikian serapan unsur-unsur N, Ca, Mn, Co, Cr dan Pb pada tanaman jagung tidak mengalami peningkatan walaupun telah diterapkan *biochar* pada pemupukan. Penambahan *biochar* menyebabkan pengurangan serapan N pada tanaman jika diterapkan Bersama dengan mineral *fertilizer* atau pupuk kandang atau kombinasi keduanya dibandingkan dengan pupuk yang diterapkan tanpa *biochar* (Lehmann *et al.*, 2003b). Kammann *et al.* (2011) juga mengamati pengurangan konsentrasi N dalam tanaman uji, tetapi dalam kasus ini, pengurangan tersebut kemungkinan disebabkan oleh peningkatan efisiensi penggunaan N karena terdapat peningkatan biomassa hingga 60%. Hasil berbeda dilaporkan oleh Uzoma *et al.* (2011) yang menerapkan penambahan *biochar* pada pemupukan tanaman jagung yaitu meningkatnya serapan N pada tanaman tersebut. Demikian juga serapan N meningkat pada tanaman gandum yang ditanam di rumah kaca ketika *biochar* ditambahkan pada saat pemupukan. Penambahan *biochar* dalam pemupukan dapat meningkatkan serapan Ca pada tanaman jagung (Uzoma *et al.*, 2011). Demikian

juga penambahan *biochar* meningkatkan serapan Ca pada tanaman kacang panjang ketika *biochar* dikombinasikan dengan mineral dan/atau pupuk organik (Lehmann *et al.*, 2003b). Namun penyerapan unsur-unsur Na, Cu, Ni, dan Cd lebih rendah pada tanaman jagung setelah penambahan *biochar*. Penambahan *biochar* menyebabkan menurunnya penyerapan unsur Na pada tanaman, hal ini karena Na adalah antagonis bagi K, sehingga jika serapan unsur K meningkat maka sebaliknya serapan unsur Na menurun.

Biochar mengurangi konsentrasi Cu secara signifikan pada tanaman jagung bila diaplikasikan bersama dengan pupuk mineral dan biogas, tetapi tidak demikian bila diaplikasikan bersama dengan biogas terfermentasi atau kompos. Penambahan *biochar* menurunkan konsentrasi Ni secara signifikan pada tanaman jagung tidak bergantung pada jenis pupuk yang digunakan. Kemudian, penambahan *biochar* juga menurunkan konsentrasi Cd pada jagung secara signifikan bila dikombinasikan dengan biogas terfermentasi atau kompos.

Penerapan pupuk yang disertai *biochar* pada tanaman dalam pot memberikan hasil yang berbeda dengan pemupukan *biochar* yang diterapkan pada tanaman yang ditanam di tanah langsung. Biasanya *biochar* dan pupuk hanya ditambahkan pada kedalaman sekitar 15 cm tanah padahal akar dari tanaman dapat mencapai kedalaman 1 m lebih. Pemupukan pada tanaman dalam pot dapat lebih homogen sehingga *biochar* akan melepaskan unsur-unsur hara yang diperlukan tanaman dengan lebih baik. Sementara pada tanaman yang langsung tumbuh di tanah, penyerapan unsur-unsur hara ini agak terhambat karena akar yang terletak lebih dalam dari paparan *biochar* dan pupuk yang diberikan (Lehmann *et al.*, 2003b). Jadi untuk tanaman yang akarnya terletak sangat dalam pengaruh *biochar* agak kurang dalam mensuplai unsur-unsur hara melalui retensi nutrisi yang baik (Laird *et al.*, 2010; Knowles *et al.*, 2011).

Penambahan *biochar* pada tanah juga dapat mempengaruhi proses fisiko-kimia dan biologis seperti adsorpsi dan desorpsi, kompleksitas/disosiasi, oksidasi/reduksi dan mobilisasi/

imobilisasi (Uchimiya *et al.*, 2011) yang mengontrol mobilitas dan ketersediaan makronutrien dan mikronutrien untuk tanaman. Hal tersebut memiliki efek langsung pada serapan hara tanaman dan efek tidak langsung pada hasil panen. Interaksi kompleks ini menyebabkan efek *biochar* yang berbeda pada konsentrasi nutrisi tanaman maupun penyerapannya, tergantung pada jumlah *biochar* dan jenis pupuk yang diterapkan bersama. Studi lebih lanjut diperlukan untuk mempelajari interaksi secara spesifik antara tanah-air-tanaman dengan *biochar* dan nutrisi atau logam berat.

BIOFERTILIZER BERBASIS BIOCHAR

Indonesia adalah negara dengan iklim tropis yang mengalami dua musim yaitu musim hujan dan musim kemarau. Sebagian wilayah Indonesia adalah lahan pertanian dengan tanah yang subur namun sebagian lagi berupa tanah tegalan yang cenderung kering pada musim panas dan hanya mengandalkan curah hujan jika digunakan untuk perkebunan. Pertanian dan perkebunan di Indonesia bergantung pada kondisi iklim yang terkadang ekstrim seperti musim hujan yang panjang dan periode kekeringan yang berkepanjangan.

Mengubah tanah dengan *biochar* mulai berkembang setelah proses tersebut dikenal ribuan tahun yang lalu di Lembah Amazon yang dikenal dengan tanah subur yang disebut terra preta (bumi gelap) yang diciptakan oleh penduduk asli. Antropolog berspekulasi bahwa memasak api dan puing-puing dapur bersama dengan penempatan yang disengaja dari arang di dalam tanah menghasilkan tanah dengan kesuburan dan kandungan karbon yang tinggi. *Biochar* adalah material yang kaya karbon yang dapat menyerap karbon dalam tanah, memperbaiki sifat-sifat tanah dan hasil pertanian. Namun, penelitian terbaru menunjukkan kinerja *biochar* yang kontras. Banyak penelitian yang menyarankan penggunaan *biochar* murni untuk digunakan di lingkungan tropis. Beberapa penelitian melaporkan tentang kinerja *biochar* dalam kombinasi dengan pupuk pada iklim sedang.

Karena sifat fisik dan kimia *biochar*, ia memiliki kemampuan unik untuk menarik dan menahan kelembapan,

nutrisi, dan bahan kimia pertanian bahkan yang sulit ditahan seperti nitrogen dan fosfor. *Biochar* juga menyimpan gas; penelitian terbaru telah membuktikan bahwa tanah yang diperkaya dengan *biochar* mampu mengurangi emisi karbon dioksida (CO₂) dan *nitrous oxide* (N₂O) sebesar 50-80%. N₂O adalah gas rumah kaca yang cukup besar pengaruhnya, 310 kali lebih kuat dari CO₂ (USBI News, 2022). Fungsi *biochar* khususnya dalam bidang pertanian sangat tergantung pada karakteristik *biochar* tersebut. Karakteristik *biochar* tersebut meliputi: pH, kemampuan meretensi air, kandungan C-total, kapasitas tukar kation, dan kandungan unsur hara. Perbedaan bahan baku dan proses pirolisis untuk membentuk *biochar* (jenis alat pembakaran, suhu dan waktu pembakaran) akan menghasilkan sifat fisika-kimia *biochar* yang berbeda.

Kandungan hara dan kapasitas tukar kation dalam *biochar* relatif rendah sehingga tidak mampu mensuplai hara sedangkan pH, kandungan C-total, dan kemampuan menahan air cukup tinggi sehingga *biochar* lebih sesuai disebut sebagai pembenah tanah untuk meningkatkan kandungan bahan organik, ketersediaan air tanah dan menurunkan kemasaman tanah. Agar *biochar* bisa berfungsi dengan baik sebagai pembenah tanah, maka kandungan karbon di dalamnya minimal sebesar 20% (Atkinson *et al.*, 2010). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa aplikasi *biochar* pada tanah dapat mempengaruhi sifat tanah, misalnya kapasitas menahan air, pH atau aktivitas mikroba (Atkinson *et al.*, 2010; Glaser *et al.*, 2002). Penggunaan *biochar* juga dapat meningkatkan penyerapan nutrisi oleh tanaman (Lehmann *et al.*, 2003b). Namun ada beberapa penelitian yang menyatakan bahwa tidak ada efek signifikan pada sifat tanah, nutrisi tanaman atau produksi biomassa setelah penggunaan *biochar* dalam kondisi lapangan (Major *et al.*, 2010b). Sebagian besar penelitian dan studi tentang penggunaan *biochar* dilakukan dengan *biochar* murni pada skala laboratorium atau rumah kaca atau di bawah lingkungan tropis (Jeffrey *et al.*, 2011).

Studi *biochar* pada kondisi lapangan yang sesungguhnya seringkali menunjukkan hasil yang berbeda dengan hasil pada

skala laboratorium (Liu *et al.*, 2013). Hal ini karena variasi kondisi yang lebih heterogen namun lebih realistis. Oleh karena itu, percobaan dalam kondisi lapangan dengan jenis dan jumlah pupuk yang relevan secara agronomi memberikan hasil lebih baik dan mencerminkan kondisi yang lebih realistis. Hal ini berkaitan dengan respons ekosistem pertanian yang berbeda dalam sifat tanah, kondisi cuaca dan metode pemrosesan pertanian (Fischer & Glaser, 2012).

Sifat-sifat fisika dan kimia biochar

Sifat fisik *biochar* adalah kunci untuk memahami mekanisme dan fungsi *biochar* di dalam tanah dan potensinya dalam menurunkan jumlah karbon dioksida di atmosfer (Downie *et al.*, 2009). Penggunaan *biochar* dapat mempengaruhi struktur tanah, tekstur, porositas, distribusi ukuran partikel dan densitas, sehingga berpotensi mengubah kandungan oksigen udara, kapasitas penyimpanan air, dan status mikroba dan nutrisi tanah di daerah perakaran tanaman (Amonette & Joseph, 2009). Dalam hal ini, pengaturan air tanah itu sendiri dapat memodifikasi stabilitas *biochar* tergantung pada sifat awal dari bahan baku yang digunakan; *biochar* yang diproduksi pada suhu yang lebih rendah dan dari bahan baku yang lebih labil, akan lebih mudah diubah (Nguyen & Lehmann, 2009). Perbedaan ukuran partikel *biochar* dalam kisaran 2 – 20 mm tampaknya memiliki pengaruh terhadap hasil panen (Lehmann *et al.*, 2003c).

Biochar adalah material karbon yang mengandung hidrokarbon aromatik polisiklis dengan sederet gugus fungsional lain (Schmidt & Noack 2000). Strukturnya yang berpori mengandung sejumlah asam humat dan fulvat yang dapat diekstrak (Trompowsky *et al.*, 2005), dengan struktur molekul yang menunjukkan stabilitas kimia dan mikrobial yang tinggi, dan pergantian yang bergantung pada lingkungan pada skala waktu ribuan tahun (Cheng *et al.*, 2008). Stabilitas kadar zat organik (*soil organic carbon*) yang teramati disebabkan oleh akumulasi yang terinduksi antropogenik, melalui pirolisis, dari struktur C-aril yang

sangat tahan api, seperti di tanah gelap Amazon (Solomon *et al.*, 2007b).

Komposisi heterogen *biochar* menunjukkan bahwa permukaannya dapat bersifat hidrofilik, hidrofobik, asam maupun basa, yang semuanya berkontribusi pada kemampuannya untuk bereaksi dengan zat-zat yang larut dalam tanah. Keberagaman sifat fisik dan kimia *biochar* bergantung pada material asal *biochar* tersebut. Hal lain yang juga turut berpengaruh adalah ketersediaan oksigen dan suhu yang diterapkan saat pirolisis (Lua & Yang 2004; Amonette & Joseph 2009). Informasi deskriptif dari karakteristik *biochar* sangat penting untuk memahami pengaruh penggunaannya dalam budidaya tanaman. Informasi mengenai ketersediaan mineral juga sangat penting untuk mengetahui potensi dan manfaat penggunaan *biochar* untuk pertumbuhan tanaman.

Temperatur akhir pada saat pirolisis mempengaruhi kadar asam humat dan asam fulviat dalam *biochar* yang dihasilkan dari sumber yang sama (Trompowsky *et al.*, 2005). Demikian pula perbedaan temperatur dalam pirolisis tersebut menghasilkan *biochar* dengan sifat-sifat yang berbeda termasuk di dalamnya, konduktivitas elektrik, pH, dan konsentrasi P dan N (Chan *et al.*, 2008). Temperatur sangat berpengaruh pada tingkat kehilangan C (karbon) selama pirolisis dan perubahan struktur fisiknya (Downie *et al.*, 2009). Walaupun begitu, perbedaan temperatur selama pirolisis dihubungkan dengan terciptanya mikropori (ukuran Angstrom) yang terbentuk ketika molekul air terlepas saat terjadi dehidroksilasi. Hal ini meningkatkan porositas (luas area) tiga kali lipat (Bagreev *et al.*, 2001).

Porositas *biochar*, yang menentukan luas areanya, menunjukkan distribusi ukuran yang luas yang sangat bervariasi dan meliputi ukuran nano- (<0,9 nm), mikro- (<2 nm) hingga makropori (>50 nm) (Downie *et al.*, 2009). Ukuran yang lebih besar dari makropori sangat berpengaruh pada fungsinya di dalam tanah, seperti aerasi dan hidrologi, yang juga menyediakan habitat ceruk untuk pertumbuhan mikroba. Sementara itu, ukuran pori yang lebih kecil memfasilitasi transport molekul dan adsorpsi. Struktur

tanah bervariasi sesuai tipenya dan sangat terkait dengan distribusi ukuran partikel. Misalnya, tanah berpasir memiliki luas spesifik yang terbatas yaitu 0,01 – 0,1 m²/g), dan hanya dapat menampung sedikit air atau nutrisi dibandingkan tanah dengan luas area spesifik yang lebih besar misalnya lempung (*clay*) yaitu 5 - 750 m²/g) (Troeh & Thompson, 2005).

Penambahan *biochar* ke dalam tanah berpasir dapat meningkatkan luas area spesifik sebanyak 4,8 x relatif terhadap tanah yang berdekatan (Liang *et al.*, 2006). Sifat pori *biochar* juga penting karena dapat menyediakan perlindungan bagi beberapa organisme yang bermanfaat seperti mikoriza dan bakteri (Pietikäinen *et al.*, 2000). Porositas dan luas area *biochar* akan memberikan pengaruh yang sangat penting yaitu kapasitas retensi nutrisi karena adanya ikatan dari kation dan anion dengan permukaannya (Liang *et al.*, 2006; Chan & Xu, 2009). Jadi jika temperatur pirolisis terlalu rendah maka molekul-molekul organik akan terkondensasi kembali ke permukaan *char* hingga menutup pori-porinya dan menurunkan potensi adsorpsinya (Kwon & Pignatello, 2005; Pignatello *et al.*, 2006). Jelas bahwa sifat fisik dan kimia sumber *biochar* beserta kondisi pembuatannya memiliki dampak yang besar pada *biochar*. Ketika diterapkan pada tanah, misalnya level asam humat dan lain-lain. Jadi pertimbangan tentang bagaimana proses pirolisis dilakukan dan juga tipe bahan baku dapat dipakai untuk merancang *biochar* sesuai kebutuhan.

Biomassa organik yang berasal dari pupuk kandang dan kompos mengandung sejumlah besar karbon, nutrisi makro dan mikro (Chan & Xu 2009). Pemanfaatan sumber bahan organik ini, seperti misalnya *biochar* akan menyediakan alternatif nutrisi makro seperti N dan P, dan beberapa ion logam (misalnya Ca dan Mg), ketika dimasukkan ke dalam tanah (Lehmann *et al.*, 2003a; Gundale & DeLuca 2006; Major *et al.*, 2010a,c). Bahan baku dan kondisi pirolisis mempengaruhi kandungan mineral dalam *biochar* (Amonette & Joseph 2009), dengan adanya unsur-unsur utama dalam *biochar* yang bergantung secara linear terhadap kadar dalam bahan baku awal (Alexis *et al.*, 2007). Perbedaan relatif kadar nutrisi dalam bahan baku perlu dipertahankan bahkan

ketika disiapkan dalam kondisi pirolisis yang berbeda (DeLuca *et al.*, 2009).

Sifat Kimia Biochar

Penambahan *biochar* ke tanah mengakibatkan perubahan pH, konduktivitas elektrik (EC), kapasitas pertukaran kation (CEC) dan level nutrisi (Liang *et al.*, 2006; Amonette & Joseph 2009). Kenaikan pH tanah akibat penambahan *biochar* tidak mengejutkan mengingat adanya pengaruh serupa akibat dari penggunaan material sejenis abu dari kayu untuk memodifikasi pH dan ketersediaan nutrisi, khususnya unsur K dan P (Mahmood *et al.*, 2003). Kenaikan kapasitas tukar kation (CEC) bisa disebabkan oleh bertambahnya rapat muatan per satuan luas material organik, yang menyamai derajat oksidasi yang lebih besar, atau bertambahnya luas area untuk adsorpsi kation, atau gabungan dari keduanya. Pada tanah kuno, konsekuensi dari oksidasi permukaan maka adsorpsi material organik dan kerapatan muatannya (CEC per satuan luas) meningkat Liang *et al.*, 2006).

Penggunaan *biochar* untuk fertilisasi tanah dapat membantu mengurangi *ammonium leaching* (pelepasan ammonium). Hal ini diketahui dari suatu eksperimen rumah kaca yang mengungkapkan bahwa *ammonium leaching* berkurang sebesar 60% (Lehmann *et al.*, 2003a; Major *et al.*, 2009), sementara pada beberapa kasus, emisi N₂O juga dapat dikurangi (Spokas & Reicosky, 2009). Pada studi lain, yang menggunakan daerah Amazonian untuk percobaan, telah mengkonfirmasi bahwa *biochar* dapat bertindak sebagai adsorben untuk menurunkan N *leaching* dan meningkatkan efisiensi penggunaan N (Steiner *et al.*, 2008c). Perlu kajian yang lebih luas untuk meyakinkan bahwa proses pirolisis dan bahan baku *biochar* memiliki pengaruh untuk mengoptimalkan kadar N dalam tanah dan memberi ketersediaan yang cukup bagi tanaman. Efisiensi penggunaan N merupakan kebutuhan mutlak untuk mempertahankan populasi tumbuhan selanjutnya. Untuk mencapai hal ini perlu lebih banyak kajian dan riset untuk memahami pengaruh mekanis dari *biochar* (langsung

atau tidak langsung) khususnya pada nitrifikasi dan ketersediaan unsur N.

Biochar juga mampu mengurangi paparan logam berat (Cu dan Zn) dan kontaminan organik yang lain misalnya insektisida. Muatan-muatan positif di permukaan akan berkurang jika *biochar* mengoksidasi, yang mengubah sifat-sifat adsorpsinya (Cheng *et al.* 2008). Penerapan *biochar* juga dapat mengurangi konsentrasi zat-zat terlarut dalam tanah seperti fenol (Gundale & DeLuca, 2007). Demikian juga beberapa unsur yang toksik terhadap pertumbuhan tanaman, khususnya pada pH rendah, seperti Al, Cu dan Mn, dapat direduksi melalui penerapan *biochar* ini (Steiner *et al.*, 2008b), sedangkan ketersediaan unsur lain dapat bertambah, dengan induksi *biochar* dapat meningkatkan pH tanah dan meningkatkan unsur-unsur misalnya N, P, Ca, Mg and Mo.

Sifat Fisika

Baru sedikit publikasi tentang pengaruh penambahan *biochar* pada sifat fisik tanah. Faktor-faktor seperti mobilitas *biochar* dalam profil tanah sangat penting, khususnya yang terkait ke manfaatnya terhadap produksi tanaman dan pergerakan potensial ke dalam tanah dan permukaan air (Leifeld *et al.*, 2007). Terdapat beberapa bukti hasil penelitian bahwa *biochar* akan berpindah ke lapisan tanah yang lebih namun membutuhkan waktu relatif lama (Leifeld *et al.*, 2007; Major *et al.*, 2010a,c). Hal ini dikaitkan dengan penurunan ukuran partikel *biochar* seiring waktu di dalam tanah.

Diketahui dari tanah Amazonian bahwa kerapatan tanah lebih rendah di bagian atas walaupun tidak semuanya (Teixeira & Martins 2003). Terdapat beberapa bukti bahwa ada peningkatan densitas tanah dengan kedalamannya (Teixeira & Martins 2003). Di bagian atas porositas tanah cukup tinggi namun menurun pada kedalaman karena kandungan bahan organik. Hal ini dianggap menguntungkan bagi pertanian (Teixeira & Martins 2003). Perlu mempertimbangkan potensi evaluasi kritis manfaat penggabungan *biochar* tanah untuk meningkatkan impedansi mekanik. Beberapa tanah dengan tingkat impedansi/kekompakan yang tinggi, dan

infiltrasi rendah dapat menjadi tergenang air, dan hal ini membatasi pertumbuhan akar dan perkembangan tanaman. Dalam beberapa situasi, aplikasi biochar dapat meningkatkan permeabilitas air tanah (Asai *et al.*, 2009). Kemudahan penetrasi akar tanaman tanah diketahui berdampak pada pertumbuhan dan hasil.

Pengetahuan yang cukup diperlukan untuk mengembangkan pemahaman yang lebih baik tentang cara *biochar* diaplikasikan ke dalam tanah dan mengubah struktur fisik maupun sifatnya dalam jangka waktu yang panjang. Ini adalah tantangan untuk melakukan eksperimen jika dilakukan di tempat yang paling tepat. Desain yang cermat dan konstruksi rezim bioma tanah kemungkinan akan dibutuhkan dalam jangka pendek untuk berkembang dalam jangka panjang

Biota Tanah

Struktur dan fungsi komunitas biologis dalam tanah itu kompleks, dengan penghuninya yang bervariasi dikelompokkan menjadi alga, archaea, artropoda, bakteri, jamur, nematoda, protozoa dan invertebrata lainnya. Kehadiran dan kelimpahan variabel dari kelompok-kelompok ini memiliki efek mendalam pada fungsi dan kesehatan tanah dan produktivitas, seperti halnya aplikasi bahan organik dan *biochar*. Tanah Amazon mengandung beragam jenis mikroorganisme yang disesuaikan dengan biokimia tanah dan ekologi (Kim *et al.*, 2007; O'Neill *et al.*, 2009; Thies & Rillig, 2009). Taksonomi studi menggunakan pendekatan molekuler (gen ribosom sidik jari) menunjukkan bahwa tanah Terra preta mengandung jumlah unit taksonomi operasional (*operational taxonomy unit/OTU*) yang lebih tinggi dibandingkan dengan tanah hutan asli, yaitu 396 OTU, dibandingkan dengan 291 OTU (Kim *et al.*, 2007). Perbandingan serupa tentang kekayaan spesies bakteri menunjukkan bahwa tanah Terra preta lebih kaya 25% dari pada tanah hutan, dengan 14 kelompok filogenetik dibandingkan dengan hanya 9 di tanah hutan (Kim *et al.*, 2007).

Bakteria

Bukti dari penggunaan abu kayu, dalam percobaan pot, telah menunjukkan bahwa aktivitas bakteri, diukur melalui penggabungan isotop timidin dan leusin berlabel, meningkat sejalan dengan komunitas struktur bakteri (Mahmood *et al.*, 2003), sementara itu telah disarankan bahwa aplikasi arang ke tanah dapat memiliki dampak signifikan pada profil pemanfaatan karbon profil dan struktur populasi (O'Neill *et al.*, 2009), seiring dengan peningkatan respirasi tanah basal dan laju respirasi per mikroorganisme (Pietikäinen *et al.*, 2000; Steiner *et al.*, 2008b). Perkembangan terbaru mengindikasikan, kontradiksi, pengurangan dan stimulasi produk respiratori terukur ketika biochar yang berbeda diterapkan ke tanah yang berbeda pula (Spokas & Reicosky 2009). Sejumlah penjelasan untuk peningkatan respirasional ini telah disarankan dan termasuk juga peningkatan pH, dan ketersediaan mineral. Misalnya, adanya pelarutan fosfat heterotrofik mikroorganisme yang meningkat setelah penambahan tanah arang.

Sejalan dengan peningkatan komunitas biomassa mikroba, ada peningkatan efisiensi mikroba secara linear (yaitu CO₂ yang dilepaskan per unit karbon tanah) pada kisaran penggunaan arang dari 50 hingga 150 g kg⁻¹ tanah (Steiner *et al.*, 2008b). Ada juga pendapat bahwa *biochar* dapat mendorong pertumbuhan mikroorganisme yang menyebabkan pembusukan senyawa yang lebih labil di dalam *biochar* (Hamer *et al.* 2004). Ada beberapa penelitian yang menunjukkan bahwa aplikasi karbon aktif (Berglund *et al.*, 2004) dan *biochar* (Gundale & DeLuca, 2006) dapat meningkatkan nitrifikasi. Lingkungan mikro *biochar* juga dapat memberikan ceruk yang menguntungkan (pori-pori struktural halus) di mana konsentrasi oksigen menurun; untuk nitrogenase untuk berfungsi secara efektif, tekanan oksigen yang rendah diperlukan dengan ion Fe dan Mo (Thies & Rillig 2009).

Sedikit yang diketahui tentang dampak *biochar* pada imobilisasi N dan denitrifikasi (DeLuca *et al.*, 2009). Pengurangan NO₃ menjadi N₂ tanpa adanya oksigen dicapai melalui beberapa intermediet (NO₂, NO, N₂O) yang dapat dilepaskan ke atmosfer. *Biochar* mungkin memiliki potensi untuk mengkatalisis reduksi

N_2O menjadi N_2 , mengurangi emisi gas rumah kaca utama. Namun, bukti pendukung terbatas (van Zwieten *et al.*, 2009). Aplikasi *biochar* mungkin juga mengurangi emisi CH_4 . Konsep bahwa aplikasi *biochar* dapat mengurangi denitrifikasi membutuhkan lebih banyak penyelidikan.

Ada bukti yang menunjukkan bahwa peningkatan aplikasi *biochar* ke tanah dapat meningkatkan proporsi N yang berasal dari fiksasi oleh *Phaseolus vulgaris*, dan ini akan meningkatkan *yield* (hasil panen) (Rondon *et al.*, 2007). Efek menguntungkan ini terkait dengan peningkatan ketersediaan Mo dan B dengan peningkatan pH tanah. Rhizobia menunjukkan peningkatan fungsi di pH tanah netral, sehingga meningkatkan alkalinitas di tanah asam akan meningkatkan nodulasi dan fiksasi.

Nutrisi Tanaman

Pentingnya nutrisi mineral tanah sebagai faktor pembatas dalam memaksimalkan hasil panen, dengan unsur N merupakan faktor pembatas paling banyak telah diketahui. Nitrogen terutama terdapat di tanah dalam bentuk kompleks organik, yang selanjutnya diamonifikasi (NH_4^+) kemudian nitrifikasi (NO_3^-), sebelum diserap oleh tanaman. Sudah banyak diketahui bahwa pasca kebakaran, tanah menunjukkan perubahan dinamika nutrisi, misalnya, peningkatan siklus N dan ketersediaan N (Gundale & DeLuca, 2007). Studi dari suatu tanah rumput tipe sabana menunjukkan tren akumulasi N setelah pembakaran yang mungkin terjadi secara tidak langsung karena unsur P merangsang fiksasi N oleh *Cyanobacteria* atau stimulasi fiksasi N_2 jika terdapat spesies pembentuk akar (Ansley *et al.*, 2006), sedangkan penggunaan *biochar* telah terbukti merangsang fiksasi N dengan kacang dalam kaitannya dengan *Rhizobia* sp. Simbion (Lehmann *et al.*, 2005; Rondon *et al.*, 2007). Belum ditemukan bukti untuk mendukung gagasan bahwa bakteri pengikat N yang hidup bebas dipengaruhi oleh penggunaan *biochar* dalam tanah. Namun, diketahui bahwa kelebihan N yang dapat larut dalam tanah mengurangi fiksasi N (Dazzo dan Brill 1978), sementara ketersediaan P dapat merangsangnya, oleh karena itu keberadaannya dalam bentuk

yang larut, dapat meningkatkan fiksasi N_2 bakterial (Lehmann *et al.*, 2003a,c).

Studi *biochar* menunjukkan bahwa meskipun kerugian signifikan dari N labil teruapkan pada saat pembakaran (70-90%), residu arang dapat mengandung sejumlah besar elemen (Rovira *et al.*, 2009). Jika jaringan tanaman dipirolisis pada suhu yang relatif rendah (100 °C) karbon yang menguap bersama dengan oksigen akan hilang, sedangkan penguapan P membutuhkan 700 °C. Jadi proses pirolisis ini akan meningkatkan ketersediaan P relatif terhadap karbon dalam *biochar* (DeLuca *et al.*, 2006). Peningkatan kandungan P dalam *biochar* terlihat jelas ketika kotoran unggas dipirolisis pada 450 °C daripada 550 °C dan hal ini kemungkinan adalah penyebab yang diamati pada peningkatan hasil lobak (Chan *et al.*, 2008). Namun, ada juga bukti yang menyatakan bahwa aplikasi *biochar* tidak banyak berkontribusi secara langsung terhadap status hara tanah namun kombinasi dari *biochar* dan pemupukan-lah yang menyebabkan peningkatan hasil tanaman (Lehmann *et al.*, 2003c)

Aplikasi *biochar* untuk tanah hutan di berbagai wilayah geografis menunjukkan transformasi N terstimulasi (DeLuca *et al.*, 2006), tetapi dinamika N tanah belum dapat dipahami sepenuhnya. Sebagaimana dipahami, kapasitas *biochar* dan potensinya untuk mengadsorpsi N (NH_4^+) dan selanjutnya meningkatkan ketersediaan N untuk tanaman dapat menjelaskan respon hasil yang bervariasi; ini adalah pertanyaan kunci yang membutuhkan eksperimen lebih lanjut. Eksperimen lobak dalam pot (*Raphanus sativus*) mengungkapkan bahwa sampah hijau yang dijadikan arang tidak secara langsung meningkatkan hasil, sementara beberapa bukti menunjukkan bahwa ketika penggunaan *biochar* digabungkan dengan penambahan pupuk N maka stimulasi pertumbuhan dapat berjalan sinergis (Chan *et al.*, 2007; Chan *et al.*, 2008; Asai *et al.*, 2009),

Ketersediaan unsur hara secara alami dan serapan P oleh tanaman, sebagaimana unsur K, Ca, Zn dan Cu dalam beberapa kasus meningkat sebagai respons terhadap aplikasi arang, sementara pelepasan (pencucian) N menurun (Lehmann *et al.*,

2003a; DeLuca *et al.*, 2009; Major *et al.*, 2010a, c). Hasil panen padi terbukti meningkat dengan aplikasi *biochar* ketika diketahui tanah hanya memiliki ketersediaan P yang rendah (Asai *et al.*, 2009). Peristiwa abiotik seperti kekeringan diketahui menurunkan ketersediaan P. Sementara banyak reaksi kompleks dengan tanah liat dan bahan organik terjadi, belum jelas bagaimana perubahan fluks antara P yang tidak larut dan larut yang terkait dengan aplikasi *biochar*. Penjelasan mekanistiknya adalah termasuk *biochar* ketika bertindak sebagai sumber garam P yang dapat larut dan P yang dapat ditukar, sebagai pengubah pH tanah (yang memperbaiki logam pengkompleks P) dan sebagai penambah aktivitas mikroba dan karenanya secara tidak langsung terjadi mineralisasi P (DeLuca *et al.*, 2009). Misalnya, Steiner *et al.* (2008a) memiliki menunjukkan bahwa aplikasi *biochar* ke dataran tinggi Amazon mempengaruhi munculnya biomassa mikroba, yang dinyatakan sebagai peningkatan hasil metabolisme, yang dianggap meningkatkan kapasitas untuk melarutkan fosfat tanah.

Biochar umumnya, saat menggunakan inkubasi tanah pengujian, terlepas dari suhu produksi, memiliki potensi untuk meningkatkan P yang dapat diekstraksi (PO_4^{3-}) di dalam larutan tanah (Gundale dan DeLuca 2006, 2007). *Biochar* dapat mengubah ketersediaan P secara langsung melalui kapasitas pertukaran anion atau dengan mempengaruhi aktivitas/ketersediaan kation yang berinteraksi dengan P. Hal ini dapat menyebabkan oksida tanah dari unsur-unsur seperti aluminium dan besi tidak dapat berikatan dengan P terlarut yang memiliki keterkaitan dengan situs pertukaran *biochar* ini. Pengendapan fosfor juga mempengaruhi kelarutan P dan oleh karena itu juga jumlah yang tersedia untuk tanaman. Efektivitas (kekuatan ikatan ionik) dengan unsur apa P bergabung dan membentuk senyawa yang tidak larut dengan berbagai kation (Ca^{2+} , Al^{3+} dan $\text{Fe}^{2+/3+}$), dan selanjutnya mengendap, tergantung pada pH. *Biochar* dapat mengubah pH larutan tanah dan karena itu akan mengikat serta menyerap kation-kation dari logam ini, sehingga menghindari pengendapan dengan P. Kenaikan pH dapat meningkatkan oksida logam alkalin (Mg^{2+} , Ca^{2+} dan K^+). Hal ini menurunkan bentuk terlarut dari Aluminium

yang dianggap sebagai faktor *biochar* paling signifikan yang mempengaruhi kelarutan P (DeLuca *et al.*, 2009). Situasinya berbeda di tanah yang sudah bersifat basa atau netral; menambahkan logam alkali berpotensi meningkatkan ikatan Ca dengan P.

Biochar juga dapat memberikan efek tidak langsung pada ketersediaan P dan penyerapannya melalui perubahan lingkungan tanah untuk mikroorganisme. Jamur tanah simbiotik tercatat sebagai penambah efisiensi serapan P pada tanaman, terutama di tanah yang rendah unsurnya. Dalam kondisi ini *biochar* terbukti dapat meningkatkan hasil jagung dan kacang tanah dengan mengubah ketersediaan P (Yamato *et al.*, 2006). Kehadiran jamur simbiosis menguntungkan ini, seperti mikoriza, dan peningkatannya karena adanya *biochar*, dapat menjelaskan mengapa aplikasi nutrisi yang rendah dapat meningkatkan hasil cukup efektif. Mekanisme bagaimana hal ini bisa dicapai melibatkan hifa mikoriza yang meningkatkan intersepsi mineral yang berpotensi hilang sebagai lindi jika tidak ada *biochar* (Allen 2007). Proses untuk meningkatkan kesuburan tanah juga dapat meningkatkan tanaman gulma yang tidak diinginkan (Major *et al.*, 2003). Beberapa penelitian terbatas telah menunjukkan bahwa meskipun ada peningkatan substansial dalam tutupan lahan gulma disebabkan oleh penggunaan pupuk kandang dan kompos, penambahan *biochar* tidak mempengaruhi kelimpahan atau spesies gulma (Major *et al.*, 2005).

SIMPULAN

Kondisi tanah pertanian akan berubah seiring dengan jangka waktu dan metode pengelolaan yang tidak tepat. Pengabaian terhadap proses remediasi lahan pertanian yang tidak lagi baik akan berakibat signifikan terhadap produktivitas lahan terhadap tanaman yang dibudidayakan. Remediasi lahan pertanian yang menurun kualitasnya dapat dilakukan dengan bahan alam yang mudah, murah dan jumlahnya melimpah, namun mampu meningkatkan kualitas tanah dengan signifikan. *Biochar* yang dibuat dari biomassa yang tersedia melimpah di Indonesia dapat

difungsikan sebagai *biofertilizer*. *Biochar* dilaporkan dapat memperbaiki kualitas tanah secara signifikan dibandingkan dengan perlakuan pemupukan menggunakan pupuk komersial saja. Perbaikan kualitas tanah ini dianalisis melalui pengukuran parameter-parameter penting yang menunjukkan kualitas tanah. Selain itu, produktivitas tanah terhadap tanaman tertentu yang dibudidayakan juga dianalisis sebagai parameter penting yang mengindikasikan kembalinya kualitas tanah pada kondisi terbaiknya untuk keperluan budidaya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Negeri Semarang atas pendanaan penelitian melalui Daftar Isian Pelaksanaan Anggaran (DIPA) Universitas Negeri Semarang Nomor: DIPA-023.17.2.677507/2022, tanggal 17 November 2021, dengan Surat Perjanjian Penugasan Pelaksanaan Penelitian Dana DIPA UNNES Tahun 2022 Nomor 82.8.4/UN37/PPK.3.1/2022, tanggal 08 April 2022.

DAFTAR PUSTAKA

- Alexis, M.A., Rasse, D.P., Rumpel, C., Bardoux, G., Pechot, N., Schmalzer, P., Drake, B., & Mariotti, A., 2007. Fire Impact on C and N Losses and Charcoal Production in a Scrub Oak Ecosystem. *Biogeochemistry*, 82, pp.201–216.
- Allen, M.F., 2007. Mycorrhizal Fungi: Highways for Water and Nutrient Movement in Arid Soils. *Vadose Zone Journal*, 6, pp.291–297.
- Amonette, J.E., & Joseph, S., 2009. *Characteristics of Biochar: Microchemical Properties*. Chapter 3. Earthscan, London, pp.33–52.
- Ansley, R.J., Boutton, T.W., & Skjemstad, J.O., 2006. Soil Organic Carbon and Black Carbon Storage and Dynamics Under Different Fire Regimes and Temperate Mixed-Grass Savanna. *Glob Biogeochem Cycles*, 20.

- Asai, H., Samson, B.K., Stephan, H.M., Songyikhangsuthor, K., Inoue, Y., Shiraiwa, T., & Horie, T., 2009. Biochar Amendment Techniques for Upland Rice Production in Northern Laos: Soil Physical Properties, Leaf SPAD and Grain Yield. *Field Crops Res*, 111, pp.81–84.
- Atkinson, C.J., Fitzgerald, J.D., & Hipsley, N.A., 2010. Potential Mechanisms for Achieving Agricultural Benefits from Biochar Application to Temperate Soils: A Review. *Plant Soil*, 337, pp.1–18.
- Bagreev, A., Bandosz, T.J., & Locke, D.C., 2001. Pore Structure and Surface Chemistry of Adsorbents Obtained by Pyrolysis of Sewage Sludge-Derived Fertilizer. *Carbon*, 39, pp.1971–1979.
- Berglund, L.M., DeLuca, T.H., & Zackrisson, T.H., 2004. Activated Carbon Amendments of Soil Alters Nitrification Rates in Scots Pine Forests. *Soil Biol Biochem*, 36, pp.2067–2073.
- Blackwell, P., Riethmuller, G., & Collins, M., 2009. *Biochar Application for Soil*. Chapter 12. Earthscan, London, pp.207–226.
- Chan, K.Y., & Xu, Z., 2009. *Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement*. Chapter 5. Earthscan, London, pp.67–84.
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S., 2007. Agronomic Values of Green Waste Biochar as a Soil Amendment. *Aust J Soil Res*, 45, pp.629–634.
- Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S., 2008. Using Poultry Litter Biochars as Soil Amendments. *Aust J Soil Res*, 46, pp.437–444.
- Cheng, C.-H., Lehmann, J., & Engelhard, M.H., 2008. Natural Oxidation of Black Carbon in Soils: Changes in Molecular Form and Surface Change Along a Climosequence. *Geochim Cosmochim Acta*, 72, pp.1598–1610.
- Cheng, C.-H., Lehmann, J., Thies, J.E., Burton, S.D., & Engelhard, M.H., 2006. Oxidation of Black Carbon by Biotic and Abiotic Processes. *Org Geochem*, 37, pp.1477–1488.

- DeLuca, T.H., MacKenzie, M.D., & Gundale, M.J., 2009. *Biochar Effects on Soil Nutrient Transformation*. Chapter 14. Earthscan, London, pp.251–280.
- DeLuca, T.H., MacKenzie, M.D., Gundale, M.J., & Holben, W.E., 2006. Wildfire-Produced Charcoal Directly Influences Nitrogen Cycling in Ponderosa Pine Forests. *Soil Sci Soc Am J*, 70, pp. 448–453.
- Downie, A., Crosky, A., & Munroe, P., 2009. *Physical Properties of Biochar*. Chapter 2. Earthscan, London: 13–32.
- Fischer, D., & Glaser, B., 2012. Synergisms between Compost and Biochar for Sustainable Soil Amelioration. dalam: Kumar, S. & Bharti, A. *Management of Organic Waste*. IntechOpen.
- Glaser, B., Balashov, E., Haumaier, L., Guggenberger, G., & Zech, W., 2000. Black Carbon in Density Fractions of Anthropogenic Soils of the Brazilian Amazon Region. *Org Geochem*, 31, pp. 669–678.
- Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W., Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W., 2002. Ameliorating Physical and Chemical Properties of Highly Weathered Soils in the Tropics with Charcoal—a Review. *Biol Fertil Soils*, 35, pp.219–230.
- Gundale, M.J., & DeLuca, T.H., 2006. Temperature and Source Material Influence Ecological Attributes of Ponderosa Pine and Douglas-fir Charcoal. *For Ecol Manage*, 231, pp.86–93.
- Gundale, M.J., & DeLuca, T.H., 2007. Charcoal Effects on Soil Solution Chemistry and Growth of *Koeleria Macrantha* in the Ponderosa Pine/Douglas-fir Ecosystem. *Biol Fertil Soils*, 43, pp.303–311.
- Hamer, U., Marschner, B., Bordowski, S., & Amelung, W., 2004. Interactive Priming of Black Carbon and Glucose Mineralisation. *Org Geochem*, 35, pp.823–830.
- Jeffrey, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M., & Bastos, A.C., 2011. A Quantitative Review of the Effects of Biochar Application to Soils on Crop Productivity Using Meta-Analysis. *Agric Ecosyst Environ*, 144, pp.175–187.
- Jones, D.L., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T.H., & Murphy, D.V., 2012. Biochar-Mediated Changes in Soil Quality and

- Plant Growth in a Three Year Field Trial. *Soil Biol Biochem*, 45, pp.113–124.
- Kammann, C., Linsel, S., Goeßling, J., & Kyoro, H., 2011. Influence of Biochar on Drought Tolerance of *Chenopodium quinoa* Wild and on Soil-Plant Relations. *Plant Soil*, 345, pp.195–210.
- Karhu, K., Mattila, T., Bergstroem, I., & Regina, K., 2011. Biochar Addition to Agricultural Soil Increased CH₄ Uptake and Water Holding Capacity— Results from a Short-Term Pilot Field Study. *Agric Ecosyst Environ*, 140, pp.309–313.
- Kim, J.-S., Sparovek, G., Long, R.M., De Melo, W.J., & Crowley, D., 2007. Bacterial Diversity of Terra Preta and Pristine Forest Soil from the Western Amazon. *Soil Biol Biochem*, 39, pp. 684–690.
- Knowles, O.A., Robinson, B.H., Contangelo, A., & Clucas, L., 2011. Biochar for the Mitigation of Nitrate Leaching from Soil Amended with Biosolids. *Sci Total Environ*, 409, pp.3206–3210.
- Kwon, S., & Pignatello, J.J., 2005. Effects of Natural Organic Substances on the Surface and Adsorptive Properties of Environmental Black Carbon (Char): Pseudo Pore Blockage by Model Lipid Components and Its Implications for N₂-Probed Surface Properties of Natural Sorbents. *Environ Sci Technol*, 39, pp.7932–7939.
- Lehmann, J., da Silva Jr., J.P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & Glaser, B., 2003a. Nutrient Availability and Leaching in an Archaeological Anthrosol and Ferralsol of the Central Amazon Basin: Fertilizer, Manure and Charcoal Amendments. *Plant Soil*, 249, pp.343–357.
- Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M., 2005. Biochar Sequestration in Terrestrial Ecosystems—A Review. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 11, pp.403–427.
- Lehmann, J., Kern, D., German, L., McCann, J., Martins, G.C., & Moreira, L., 2003c. Soil Fertility and Production Potential. Chapter 6. dalam: Lehmann, J., Kern, D.C., Glaser, B., & Woods, W.I. (ed.) *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*. Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 105–124.

- Leifeld, J., Fenner, S., & Muller, M., 2007. Mobility of Black Carbon in Drained Peatland Soils. *Biogeosciences*, 4, pp.425–432.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J.O., Thies, J., Luizao, F.J., Peterson, J., & Neves, E.G., 2006. Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Sci Soc Am J*, 70, pp.1719–1730.
- Liu, J., Schulz, H., Brandl, S., Miethke, H., Huwe, B., & Glaser, B., 2012. Shortterm Effect of Biochar and Compost on Soil Fertility and Water Status of a Dystric Cambisol in NE Germany Under Field Conditions. *J Plant Nutr Soil Sci*, 175, pp.698–707.
- Liu, X., Zhang, A., Ji, C., Joseph, S., Bian, R., Li, L., Pan, G., & Jorge Paz-Ferreiro, J., 2013. Biochar's Effect on Crop Productivity and the Dependence on Experimental Conditions—a Meta-Analysis of Literature Data. *Plant Soil*, 373, pp.583–594.
- Lua, A.C., & Yang, T., 2004. Effects of Vacuum Pyrolysis Conditions on the Characteristics of Activated Carbons Derived from Pistachio-Nut Shells. *J Colloid Interface Sci*, 276, pp.364–372.
- Mahmood, S., Finlay, R.D., Fransson, A.-M., & Wallander, H., 2003. Effects of Hardened Wood Ash on Microbial Activity, Plant Growth and Nutrient Uptake by Ectomycorrhiza Spruce Seedlings. *FEMS Microbiol Ecol*, 43, pp.121–131.
- Major, J., Lehmann, J., Rondon, M., & Goodale, C., 2010a. Fate of Soil-Applied Black Carbon: Downward Migration, Leaching and Soil Respiration. *Glob Chang Biol*, 16, pp.1366–1379.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S.J., & Lehmann, J., 2010b. Maize Yield and Nutrition During 4 Years After Biochar Application to a Colombian Savanna Oxisol. *Plant Soil*, 333, pp.117–128.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S.J., & Lehmann, J., 2010c. Maize Yield and Nutrition During 4 Years After Biochar Application to a Colombian Savanna Oxisol. *Plant and Soil*, 333, pp.117–128.
- Major, J., Steiner, C., Downie, A., & Lehmann, J., 2009. Biochar Effects on Nutrient Leaching. Chapter 15. dalam: Lehmann, J. & Joseph, S. (ed.) *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. Earthscan, London, pp.271–287.

- Mustafa, A., Brtnicky, M., Hammerschmiedt, T., Kucerik, J., Kintl, A., Chorazy, T., Naveed M., Skarpa, P., Baltazar, T., Malicek, O., Holatko J., 2022. Food and Agricultural Wastes-Derived Biochars in Combination with Mineral Fertilizer as Sustainable Soil Amendments to Enhance Soil Microbiological Activity, Nutrient Cycling and Crop Production. *Frontiers in Plant Science*, 13.
- Nguyen, B.T., & Lehmann, J., 2009. Black Carbon Decomposition Under Varying Water Regimes. *Org Geochem*, 40, pp.846–853.
- Nurida,, N.L., Dariah, A., & Rachman, A., 2013. Peningkatan Kualitas Tanah dengan Pembenah Tanah Biochar Limbah Pertanian. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 37(2), pp.69-78.
- O'Neill, B., Grossman, J., Tsai, M.T., Gomes, J.E., Lehmann, J., Peterson, J., Neves, E., & Thies, J.E., 2009. Bacterial Community Composition in Brazilian Anthrosols and Adjacent Soils Characterized Using Culturing and Molecular Identification. *Microb Ecol*, 58, pp.23–35.
- Pietikäinen, J., Kiikkilä, O., & Fritze, H., 2000. Charcoal as a Habitat for Microbes and Its Effect on the Microbial Community of the Underlying Humus. *Oikos*, 89, pp.231–242.
- Pignatello, J.J., Kwon, S., & Lu, Y., 2006. Effects of Natural Organic Substances on the Surface and Adsorptive Properties of Environmental Black Carbon (Char): Attenuation of Surface Activity by Humic and Fulvic Acids. *Environ Sci Technol*, 40, pp.7757–7763.
- Rondon, M.A., Lehmann, J., Ramirez, J., & Hurtado, M., 2007. Biological Nitrogen Fixation by Common Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) Increases with Bio-Char Additions. *Biol Fertil Soils*, 43, pp.699–708.
- Rovira, P., Duguay, B., & Vallejo, V.R., 2009. Black Carbon in Wildfire-Affected Shrubland Mediterranean Soils. *J Plant Nutr Soil Sci*, 172, pp.43–52.
- Schmidt, M.W.I., & Noack, A.G., 2000. Black Carbon in Soils and Sediments: Analysis, Distribution, Implications and Current Challenges. *Glob Biogeochem Cycles*, 14, pp.777–793.

- Solomon, D., Lehmann, J., Thies, J., Schafer, T., Liang, B., Kinyangi, J., Neves, E., Peterson, J., Luizao, F., & Skjemstad, J., 2007b. Molecular Signature and Sources of Biochemical Recalcitrance of Organic C in Amazonian Dark Earths. *Geochim Cosmochim Acta*, 71, pp.2285–2298.
- Spokas, K.A., & Reicosky, D.C., 2009. Impacts of Sixteen Different Biochars on Soil Greenhouse Gas Production. *Ann Environ Sci*, 3, pp.179–193.
- Steiner, C., Das, K.C., Garcia, M., Forester, B., & Zech, W., 2008a. Charcoal and Smoke Extract Stimulate the Soil Microbial Community in a Highly Weathered Xanthic Ferralsol. *Pedobiologia*, 51, pp.359–366.
- Steiner, C., de Arruda, M.R., Teixeira, W.G., & Zech, W., 2008b. Soil Respiration Curves as Soil Fertility Indicators in Perennial Central Amazonian Plantations Treated with Charcoal, and Mineral or Organic Fertilisers. *Trop Sci*, 2008
- Steiner, C., Glaser, B., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Blum, W.E.H., & Zech, W., 2008c. Nitrogen Retention and Plant Uptake on a Highly Weathered Central Amazonian Ferraisol Amended with Compost and Charcoal. *J Plant Nutr Soil Sci*, 171, pp.893–899.
- Teixeira, W.G., & Martins, G.C., 2003. Soil Physical Characterization. Chapter 15. dalam: Lehmann, J., Kern, D.C., Glaser, B., & Woods, W.I. (ed.) *Amazonian Dark Earths Origin Properties Management*. Kluwer Academic, Dordrecht, pp.271–286.
- Thies, J.E., & Rillig, M.C., 2009. Characteristics of Biochar: Biological Properties. Chapter 6. dalam: Lehmann, J. & Joseph, S. (ed.) *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. Earthscan, London, pp.85–10.
- Troeh, F.R., & Thompson, L.M., 2005. *Soils and Soil Fertility*. Edisi 5. Blackwell, Iowa.
- Trompowsky, P.M., Benites, V.M., Madari, B.E., Pimenta, A.S., Hockaday, W.C., & Hatcher, P.G., 2005. Characterisation of Humic Like Substances Obtained by Chemical Oxidation of Eucalyptus Charcoal. *Org Geochem*, 36, pp.1480–1489.

- Uchimiya, M., Chang, S., & Klasson, K.T., 2011. Screening Biochars for Heavy Metal Retention in Soil: Role of Oxygen Functional Groups. *J Hazard Mater*, 190, pp.432–441.
- USBI News., 2022. *Biochar Enhances Crop Yield, Enriches Soil & Protects Water*.
- Uzoma, K.C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E., 2011. Effect of Cow Manure Biochar on Maize Productivity Under Sandy Soil Condition. *Soil Use Manag*, 27, pp.205–212.
- Van Zwieten, L., Singh, B., Joseph, S., Kimber, S., Cowie, A., & Chan, K.Y., 2009. Biochar and Emission of Non-CO₂ Greenhouse Gases from Soil. Chapter 13. dalam: Lehmann, J. & Joseph, S. (ed.) *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. Earthscan, London, pp.227–249.
- Wiedner, K., Rumpel, C., Steiner, C., Pozzi, A., Maas, R., & Glaser, B., 2013. Chemical Evaluation of Chars Produced by Thermochemical Conversion (Gasification, Pyrolysis and Hydrothermal Carbonization) of Agro-Industrial Biomass on a Commercial Scale. *Biomass Bioenergy*, 59, pp.264–278.
- Woolf, D., 2008. *Biochar as a Soil Amendment: a Review of the Environmental Implications*.
- Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I.F., Anshori, S., & Ogawa, M., 2006. Effects of the Application of Charred Bark in Acacia Mangium on the Yield of Maize, Cowpea, Peanut and Soil Chemical Properties in South Sumatra, Indonesia. *Soil Sci Plant Nutr*, 52, pp.489–495.